

## การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประดิษฐ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล The Applications of Microcontroller for a Digital pH Meter Invention

ณัฐริกา คำเขียว<sup>1</sup> พงศธร สุธะมูล<sup>2</sup> และสุทธิดา จำรัส<sup>3\*</sup>

Nattarika Kamkiew<sup>1</sup> Pongsathorn Suyamoon<sup>2</sup> and Suthida Chamrat<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> หลักสูตรศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , nattarika\_k@cmu.ac.th  
(Education Program in Chemistry, Faculty of Education, Chiang Mai University)

<sup>2</sup> โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , pongsathon.s@cmu.ac.th  
(Chiang Mai University Demonstration School)

<sup>3\*</sup> สาขาวิทยาศาสตร์ ภาควิชาหลักสูตร การสอนและการเรียนรู้ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , suthida.c@cmu.ac.th  
(Science Division, Department of Curriculum, Instruction and Learning, Chiang Mai University)

### บทคัดย่อ

ในการจัดการเรียนการสอนวิชาเคมี การทดลองในห้องปฏิบัติการมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งบางครั้งต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะ เช่น เครื่องวัด pH ส่งผลให้โรงเรียนขนาดเล็กหรือโรงเรียนที่ยังไม่มีความพร้อม ขาดอุปกรณ์ในการเรียนรู้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ยังไม่ถึงเป้าหมายหรือบรรลุมาตรฐานการเรียนรู้ นอกจากนี้ สารการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในปัจจุบันได้เพิ่มวิชาวิทยาการคำนวณเป็นวิชาใหม่ของหลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนานักเรียนในด้านการคิดเชิงคำนวณ การใช้เทคโนโลยีอย่างเหมาะสม และรู้เท่าทันสื่อและเทคโนโลยีดิจิทัล ประกอบกับอุปกรณ์ในกลุ่มไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ ที่สามารถวัดค่าทางวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันมีราคาที่ไม่สูงมากและสามารถเข้าถึงแหล่งจำหน่ายได้ เมื่อนำความรู้พื้นฐานในวิทยาการคำนวณมาประยุกต์ใช้และพัฒนาอุปกรณ์ร่วมกับวิชาเคมี ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะประดิษฐ์ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล ของสารละลายอย่างง่ายโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุม การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ (1) เพื่อประดิษฐ์ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ และ (2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลกับเครื่องวัด pH มาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ และเครื่องวัด pH ในชุดอุปกรณ์ Vernier LabQuest จากการศึกษาพบว่าเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลที่ประดิษฐ์ขึ้นมา มีประสิทธิภาพในการวัดค่า pH ใกล้เคียงกับ เครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สามารถใช้ทดแทนการใช้งานเครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีราคาสูงได้ โดยมีข้อดีคือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาต่ำและประกอบได้ง่าย ผู้สอนสามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้ วิชาเคมี ประยุกต์ในการทดลองอื่น ๆ รวมทั้งออกแบบบทเรียนแบบบูรณาการเพิ่มเติมได้

คำสำคัญ: กรดเบส เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล ไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดีโน

## ABSTRACT

In teaching and learning of chemistry, laboratory experiments are particularly important. Sometimes it requires specialized equipment such as a pH meter. Resulting small-sized schools or schools that are not unable to provide that equipment cannot deliver effective science learning and are not able to achieve education goals or learning standards. Furthermore, science strand recently includes computing science as a new subject in science and technology curriculum. The curriculum aims to develop students' computational thinking, the appropriate use of technology, and media and digital literacy. Beside, the cost of microcontroller and sensor that can be used to measure scientific data are drastically decreasing and accessible. When applying basic knowledge in computational science and developing the device in combination with chemistry concepts hence the researchers' interest in the invention of simple pH meter using microcontroller. This research aims to (1) invent digital pH meter using microcontroller and (2) compare the effectiveness of digital pH meter to laboratory standard pH meter and pH meter as a testing kit of Vernier LabQuest set. The study found that the effectiveness of digital pH meter is similar to laboratory standard pH meter and LabQuest pH meter. It can substitute with costly laboratory grade pH meters. The advantages of digital pH meter are low-cost and easy to assemble. The instructors can be applied to chemistry class, other experiments including the integrative STEM learning.

**KEYWORDS:** Acid-base, Digital pH meter, Microcontroller, Arduino

*\*Corresponding author, E-mail : suthida.c@cmu.ac.th*

*Received: 6 October 2020 / Revised: 24 November 2020 / Accepted: 3 December 2020 / Published online: 31 August 2021*

## บทนำ

ในการจัดการเรียนการสอนในวิชาเคมีส่วนหนึ่งของการจัดการเรียนการสอนคือ การทำการทดลอง ซึ่งบางครั้งต้องใช้ อุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อการทดลองเรื่องใดเรื่องหนึ่งโดยเฉพาะ เช่น เครื่องวัด pH หรือ pH meter และ Spectrophotometer เป็นต้น ซึ่งพบว่าสื่ออุปกรณ์ประเภทของจริงจึงมีความสำคัญกับการจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก (ทวีศักดิ์ จินดานุรักษ์, 2559) อย่างไรก็ตาม สื่อและอุปกรณ์บางอย่างเป็นอุปกรณ์เฉพาะทาง เพราะถึงแม้จะใช้สื่อ ใกล้ตัวที่ทดแทนได้ แต่กิจกรรมทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะวิชาเคมีจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เหล่านั้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคา แพง โรงเรียนขนาดเล็กหลาย ๆ แห่งไม่มีงบประมาณในการจัดซื้อ ส่งผลให้โรงเรียนขาดทั้งอุปกรณ์เพื่อเป็นเครื่องมือและสื่อ ในการเรียนรู้ทำให้การเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ไม่เต็มศักยภาพ

การเรียนรู้ในหัวข้อกรดเบสในรายวิชาเคมี ปรากฏในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ตามสาระการเรียนรู้ข้อที่ 2 ผลการเรียนรู้ ม.5/20 ที่ระบุไว้ว่า ผู้เรียนสามารถ “ทดลอง และอธิบายหลักการการไทเทรตและเลือกใช้อินดิเคเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับการไทเทรตกรด-เบส” (กระทรวงศึกษาธิการ, 2560) ในหัวข้อนี้ นักเรียนจะได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไทเทรต ซึ่งในการทดลองถ้าต้องการทราบจุดยุติของการไทเทรตส่วนใหญ่นิยมใช้อินดิเคเตอร์ในการบอกจุดยุติในการไทเทรต แต่ถ้าหาก ต้องการทราบค่า pH ของสารละลายขณะทำการไทเทรต จะใช้เครื่องวัด pH ในการบอกค่า pH ของสารละลาย และสามารถนำ

ค่าที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องวัด pH นั้นไปเขียนกราฟการไทเทรต การวัดค่า pH จึงมีความสำคัญดังปรากฏในหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เคมี เล่ม 4 ในหน้า 43 ที่ปรากฏภาพของเครื่องวัด pH (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2562) ผู้เรียนทั้งในสาระเพิ่มเติมและสาระการเรียนรู้ 2.1 วิทยาศาสตร์ กายภาพ ที่มีเนื้อหาเคมีสำหรับผู้เรียนในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่ไม่เน้นวิทยาศาสตร์จึงต้องได้สัมผัสและได้ใช้ เครื่องมือจริง ซึ่งจะเป็นประสบการณ์ตรงที่ส่งเสริมการเรียนรู้เคมีได้ โดยเพิ่มความสนใจในการเรียนรู้ของผู้เรียน (Holstermann, & Bögeholz, 2010) ส่งเสริมการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในหลายมิติ ทั้งความรู้ ทักษะ เจตคติต่อ/ทาง วิทยาศาสตร์ ความเข้าใจธรรมชาติของวิทยาศาสตร์ รวมไปถึงการให้เหตุผลทางวิทยาศาสตร์ (National Research Council, 2006) โดยเฉพาะในวิชาเคมีที่หากผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติ จะมีส่วนร่วมในการเรียนรู้ ได้พัฒนาแนวคิดทางวิทยาศาสตร์และ ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ไปพร้อมกัน (Selco et al., 2012)

เครื่องวัด pH เป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้วัด pH ของสารละลาย โดยใช้หลักการวัดความต่างศักย์ (Potentiometer) ที่เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) ส่วนประกอบของ เครื่องวัด pH ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ครบวงจร ได้แก่ อิเล็กโทรด และตัวเครื่อง โดยทั่วไป โรงเรียนจะเป็นผู้จัดหาอุปกรณ์เหล่านี้จากการซื้อมาใช้แต่หากขาดแคลนงบประมาณ ก็ไม่สามารถจัดซื้อใช้ในการเรียน การสอนได้ ในการแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์วิทยาศาสตร์มีการรายงานว่า แนวคิดการประดิษฐ์ด้วยตนเอง (Do-it-Yourself, DIY) สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ (Yayon, 2019) รวมทั้งการประดิษฐ์อุปกรณ์การทดลองต้นทุนต่ำ (สายรุ้ง ชาวสุภา, 2559) และอุปกรณ์การทดลองทางเคมีแบบย่อส่วน (Supasorn, 2015) ดังที่ อาร์ชีชีะ ดินอะ และคณะ (2558) ได้ดำเนินการ วิจัยเรื่องชุดการไทเทรตอย่างง่ายแบบย่อส่วนและต้นทุนต่ำสำหรับปฏิบัติการระดับไมโครในห้องเรียน โดยการประดิษฐ์ชุดการ ไทเทรตจากยกรบอกรีดขนาด 10 มิลลิลิตร ขั้วต่อสามทางขวดแก้วขนาดเล็กขนาด 30 มิลลิลิตร ฝาปิดจุกยาง เหล็กเสียบ กระดาษ และคลิปหนีบกระดาษ ซึ่งชุดไทเทรตที่พัฒนานี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับชุดไทเทรตมาตรฐาน มีร้อยละของความผิดพลาด (% error) ต่ำกว่าร้อยละ 5% จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนาเครื่องมือวัดกรดเบสด้วยวิธีการสร้างเครื่องมือ วัดค่า pH โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ชนิด PIC12F675 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดแปดบิต (Masud et al., 2011) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Tiva (Papadopoulos & Jannakoudakis, 2016) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าการ ประดิษฐ์เครื่องวัด pH ที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยมีราคาต่ำสุดของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino อยู่ที่ 10 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณสาม ร้อยกว่าบาท (Kubínová and Šlégr, 2015) ในขณะที่เครื่องวัด pH ในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปมีราคาอยู่ที่หลักพันขึ้นไป โดยในการวิจัยครั้งนี้จะแตกต่างจากงานอื่นที่ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้มีความซับซ้อนน้อยกว่า การเขียนโค้ดที่ใช้ภาษาซีเหมาะสม กับระดับของนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายในหลักสูตรวิทยาการคำนวณของประเทศไทย (กระทรวงศึกษาธิการ, 2560)

ปัจจุบัน วิชาวิทยาการคำนวณ เป็นวิชาใหม่ของนักเรียนไทย จัดอยู่ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามที่ กระทรวงศึกษาธิการ (2560) ระบุในตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์(ฉบับปรับปรุง พุทธศักราช 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 เพื่อต้องการพัฒนานักเรียนในด้านการคิด เชิงคำนวณ (Computational Thinking) การใช้เทคโนโลยีอย่างเหมาะสม (Digital Technology) และ รู้เท่าทันสื่อและ เทคโนโลยีดิจิทัล (Media and Information Literacy) ประกอบกับอุปกรณ์ในกลุ่มไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซนเซอร์

(sensor) สามารถใช้ความรู้พื้นฐานในรายวิชาวิทยาการคำนวณมาประยุกต์ใช้และพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ อีกทั้งอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาที่ไม่สูง อีกด้วย

จากปัญหาและแนวทางแก้ปัญหาที่กล่าวไป ผู้วิจัยจึงคิดแก้ไขปัญหาโดยนำความรู้ทางวิทยาการคำนวณ เรื่อง ไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาในการประดิษฐ์ เครื่องวัดค่า pH ของสารละลายอย่างง่ายแบบดิจิทัล โดยอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ง่ายและราคาไม่สูงจนเกินไป มีวิธีการประดิษฐ์ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน ผู้เรียนในระดับมัธยมศึกษาสามารถดำเนินการได้ภายใต้คำแนะนำของครูกลุ่มสาระวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ผลจากการวิจัยจะเป็นแนวทางให้ผู้สอนสามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้วิชาเคมี ประยุกต์ในการทดลองอื่น ๆ รวมทั้งออกแบบบทเรียนแบบบูรณาการ สะเต็มได้

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อประดิษฐ์ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล กับเครื่องวัด pH มาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

### นิยามศัพท์เฉพาะ

1. เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล หมายถึง ชุดอุปกรณ์ในการวัดค่า pH ของสารละลายแบบดิจิทัลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โดยประดิษฐ์จากอุปกรณ์ที่มีราคาต่ำ ประกอบด้วย pH Controller Electrode Probe BNC, Sensor Module Monitoring Control Board, LCD (Yellow Screen) 16x2 LED with backlight of the LED screen และ Arduino UNO R3

### ประโยชน์ที่ได้รับ

1. อุปกรณ์ต้นแบบเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ข้อมูลประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลเมื่อเทียบกับกับเครื่องวัด pH มาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
3. แนวทางการนำเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลไปประยุกต์ใช้ในห้องเรียน

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการประดิษฐ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ เครื่องวัด pH IONIX และเครื่องวัด pH Vernier LabQuest 2 ผู้วิจัยนำเสนอการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอน ในสี่หัวข้อคือ (1) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล (2) วิธีการสร้างเครื่องมือ (3) การเก็บรวบรวมข้อมูล และ (4) สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

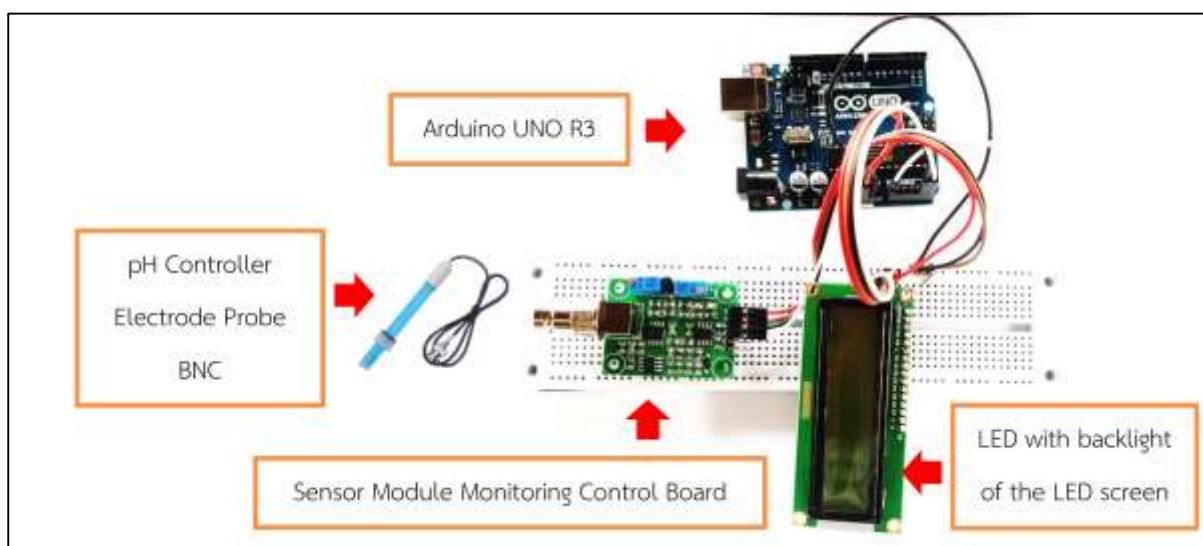
### เครื่องมือวิจัย

การเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องมือ 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล เครื่องวัด pH IONIX และ Vernier LabQuest 2 ซึ่งเครื่องวัด pH IONIX เป็นเครื่องมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของโรงเรียนสาธิตของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และใช้ในกิจกรรมของนักเรียนในโครงการสนับสนุนการจัดตั้งห้องเรียนวิทยาศาสตร์ในโรงเรียน โดยการกำกับดูแลของมหาวิทยาลัย (โครงการ วมว.) ส่วนเครื่องวัด pH Vernier LabQuest 2 เป็นอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานและใช้ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ (Holmquist et al., 2007)

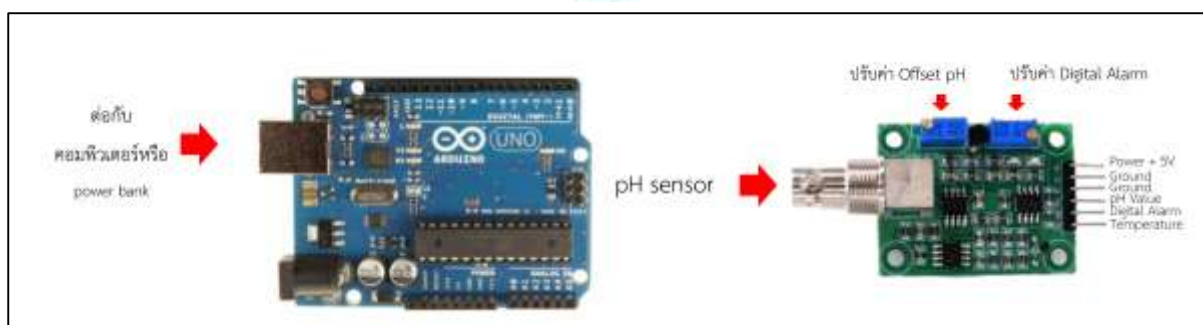
## วิธีการสร้างเครื่องมือ

ในการประดิษฐ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล ใช้อุปกรณ์ในการประดิษฐ์ ได้แก่ pH Controller Electrode Probe BNC, Sensor Module Monitoring Control Board, LCD (Yellow Screen) 16x2 LED with backlight of the LED screen และ Arduino UNO R3 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. ศึกษาแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกรดเบส และแนวคิดเกี่ยวกับการบูรณาการวิทยาการคำนวณในเนื้อหาวิชาเคมี
2. ศึกษาโค้ดที่เกี่ยวข้องและปรับโค้ดโดยใช้โปรแกรม Arduino IDE
3. ทดลองต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันพร้อมทั้งตรวจสอบและแก้ไขโค้ด โดย เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล มีรูปแบบวงจรการต่อ ดังภาพ 1



ภาพ 1 การต่อวงจรอุปกรณ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล



ภาพ 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และ แผงวงจรสำหรับเชื่อมต่อเซ็นเซอร์

การเขียนโปรแกรม ผู้วิจัยเขียนโปรแกรมโดยใช้ ภาษาซีรุ่มโปรแกรม Arduino IDE 1.6.10 และมีรายละเอียดการเขียนโปรแกรม (Programming) ดังตาราง 1

ตาราง 1 การเขียนคำสั่งภาษาซีและความหมาย

| คำสั่ง                               | ความหมาย                                                        |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 #include <Wire.h>                  | บรรทัดที่ 1 ใช้ไลบรารีในการสื่อสารแบบ I2C                       |
| 2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>     | บรรทัดที่ 2 ใช้ไลบรารีในการควบคุม LCD แบบ I2C                   |
| 3 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);  | บรรทัดที่ 3 สร้างออบเจกต์คลาสแล้วนำไปเก็บยังตัวแปร LCD          |
| 4 const int analogInPin = A0;        | แอดเดรส 0x27 ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด                          |
| 5 int sensorValue = 0;               |                                                                 |
| 6 unsigned long int avgValue;        | บรรทัดที่ 4 กำหนดอินพุตพอนาล็อกช่อง 0 ให้รับค่าจาก pH           |
| 7 float b;                           | เซนเซอร์                                                        |
| 8 int buf[10],temp;                  | บรรทัดที่ 5 - 8 เป็นการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม       |
| 9 void setup()                       | เพื่อรับค่าจาก pH เซนเซอร์                                      |
| 10 {                                 |                                                                 |
| 11 Serial.begin(115200);             |                                                                 |
| 12 lcd.init();                       | บรรทัดที่ 9 เป็นฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานของ       |
| 13 lcd.backlight();                  | Hardware จะทำฟังก์ชันนี้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น                   |
| 14 lcd.setCursor(0,0);               | บรรทัดที่ 10 เริ่มต้นการสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้      |
| 15 lcd.print("*** PH Meter ***");    | ความเร็วในการรับส่งข้อมูล 115200                                |
| 16 lcd.setCursor(0,1);               | บรรทัดที่ 12 - 14 เริ่มต้นการทำงานกับ LCD โมดูลโดยสั่งให้ไฟพื้น |
| 17 lcd.print("PH = ");               | หลังติด เริ่มต้นที่ตำแหน่ง 0, 0                                 |
| 18 }                                 | บรรทัดที่ 15 สั่งให้ LCD โมดูลแสดงข้อความ *** pH Meter *** ที่  |
| 19                                   | บรรทัดบนสุด                                                     |
| 20 void loop()                       | บรรทัดที่ 16 สั่งให้เลื่อนตำแหน่งของเคอร์เซอร์ลงมาบรรทัดที่สอง  |
| 21 {                                 | บรรทัดที่ 17 สั่งให้ LCD โมดูลแสดงข้อความ PH = บรรทัดที่สอง     |
| 22 for(int i=0 ; i<10 ; i++)         | บรรทัดที่ 18 เป็นฟังก์ชันหลัก และจะทำงานวนรอบไปเรื่อยๆ          |
| 23 {                                 | จนกว่าจะปิดระบบ                                                 |
| 24 buf[i] = analogRead(analogInPin); | บรรทัดที่ 22 - 26 จะเป็นชุดคำสั่งสำหรับวนอ่านค่าจาก pH          |
| 25 delay(10);                        | เซนเซอร์จำนวน 10 รอบ                                            |
| 26 }                                 |                                                                 |
| 27 for(int i=0 ; i<9 ; i++)          |                                                                 |
| 28 {                                 |                                                                 |
| 29 for(int j=i+1 ; j<10 ; j++)       |                                                                 |
| 30 {                                 | บรรทัดที่ 27 - 38 จะเป็นชุดคำสั่งสำหรับการจัดเรียงลำดับข้อมูล   |
| 31 if(buf[i] > buf[j])               | จากน้อยไปมาก                                                    |
| 32 {                                 |                                                                 |
| 33 temp = buf[i];                    |                                                                 |
| 34 buf[i] = buf[j];                  |                                                                 |

| คำสั่ง                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ความหมาย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> 35  buf[j] = temp; 36  } 37  } 38  } 39  avgValue = 0; 40  for(int i=2 ; i&lt;8 ; i++) 41  { 42  avgValue+=buf[i]; 43  } 44  float pHVol = (float)avgValue*5.0/1024/6; 45  float pHValue = -5.70 * pHVol + 21.34; 46  Serial.print("sensor = "); 47  Serial.println(pHValue); 48  lcd.setCursor(0,1); 49  lcd.print("PH = "); 50  lcd.print(pHValue); 51  lcd.print(" "); 52  delay(300); 53  }</pre> | <p>บรรทัดที่ 39 เคลียร์ค่าตัวแปร avgValue</p> <p>บรรทัดที่ 40 - 43 จะเป็นชุดคำสั่งสำหรับการนำค่าที่เก็บในหน่วยความจำตั้งแต่ตำแหน่งที่ 2 ถึง 8 มาบวกกันแล้วเก็บไว้ในตัวแปร avgValue เพื่อจะทำให้เป็นค่าเฉลี่ย</p> <p>บรรทัดที่ 44 ทำการคำนวณค่าที่อ่านจาก pH เซนเซอร์เพื่อทำให้เป็นแรงดัน</p> <p>บรรทัดที่ 45 ทำการคำนวณค่าที่เป็นแรงดันให้เป็นค่าของ pH</p> <p>บรรทัดที่ 46 - 47 จะเป็นชุดคำสั่งสำหรับส่งข้อความและค่าของ pH เซนเซอร์ไปแสดงที่เครื่องคอมพิวเตอร์</p> <p>บรรทัดที่ 48 - 51 จะเป็นชุดคำสั่งสำหรับส่งข้อความและค่าของ pH เซนเซอร์ไปแสดงยังบรรทัดที่สองของ LCD โมดูล</p> <p>บรรทัดที่ 52 หน่วงเวลาไว้ 0.3 วินาที</p> |

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยใช้การทดสอบวัดค่า pH ตัวอย่างสาร 10 ชนิด ได้แก่ Buffer pH 4.00 Buffer pH 7.00 Buffer pH 10.00 น้ำส้มสายชู น้ำสบู่ น้ำประปา น้ำยาล้างจาน น้ำยาล้างห้องน้ำ น้ำขี้เถ้า และ น้ำเกลือ

### สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

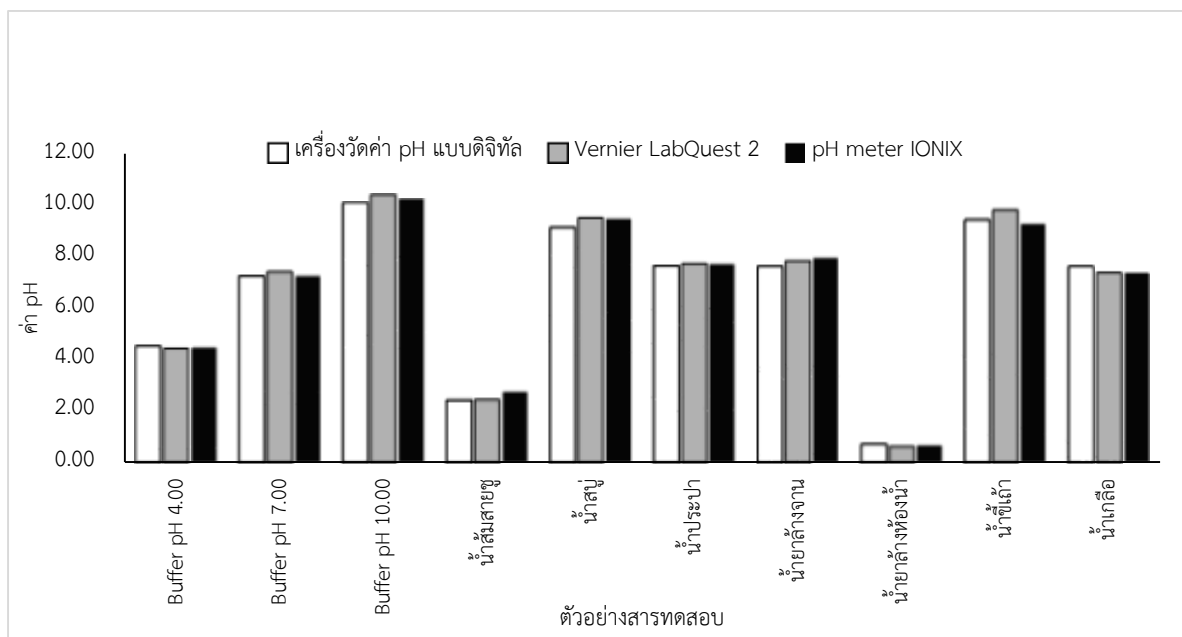
ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการใช้วิธีการทางสถิติได้แก่ ค่าเฉลี่ย โดยทำการทดสอบ วัดค่า pH ตัวอย่างสาร 3 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย การหาค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Two-Factor Without Replication ANOVA

## ผลการวิจัย

จากการเก็บข้อมูลการวัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดทั้งสามประเภท ได้ผลดังตาราง 2

ตาราง 2 ผลการวัดค่า pH ของ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล เครื่องวัด pH IONIX และ เครื่องวัด pH Vernier LabQuest 2

| ตัวอย่าง<br>สารทดสอบ | ค่า pH                      |               |               |        |                    |               |               |        |                                 |               |               |        |
|----------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------|--------------------|---------------|---------------|--------|---------------------------------|---------------|---------------|--------|
|                      | เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล |               |               |        | Vernier LabQuest 2 |               |               |        | IONIX เครื่องวัดกรดเบส pH Meter |               |               |        |
|                      | ครั้งที่<br>1               | ครั้งที่<br>2 | ครั้งที่<br>3 | เฉลี่ย | ครั้งที่<br>1      | ครั้งที่<br>2 | ครั้งที่<br>3 | เฉลี่ย | ครั้งที่<br>1                   | ครั้งที่<br>2 | ครั้งที่<br>3 | เฉลี่ย |
| Buffer pH<br>4.00    | 4.53                        | 4.47          | 4.55          | 4.52   | 4.40               | 4.41          | 4.43          | 4.41   | 4.50                            | 4.45          | 4.47          | 4.47   |
| Buffer pH<br>7.00    | 7.26                        | 7.18          | 7.22          | 7.22   | 7.37               | 7.38          | 7.41          | 7.39   | 7.24                            | 7.27          | 7.25          | 7.25   |
| Buffer pH<br>10.00   | 10.04                       | 10.11         | 10.08         | 10.08  | 10.39              | 10.37         | 10.35         | 10.37  | 10.24                           | 10.19         | 10.25         | 10.23  |
| น้ำส้มสายชู          | 2.58                        | 2.23          | 2.42          | 2.41   | 2.42               | 2.45          | 2.43          | 2.43   | 2.75                            | 2.73          | 2.77          | 2.75   |
| น้ำสบู่              | 9.18                        | 9.06          | 9.12          | 9.12   | 9.45               | 9.49          | 9.46          | 9.47   | 9.43                            | 9.47          | 9.46          | 9.45   |
| น้ำประปา             | 7.70                        | 7.54          | 7.66          | 7.63   | 7.71               | 7.68          | 7.70          | 7.70   | 7.71                            | 7.70          | 7.70          | 7.70   |
| น้ำยาล้าง<br>จาน     | 7.62                        | 7.55          | 7.67          | 7.61   | 7.84               | 7.78          | 7.82          | 7.81   | 7.97                            | 7.93          | 7.95          | 7.95   |
| น้ำยาล้าง<br>ห้องน้ำ | 0.66                        | 0.74          | 0.68          | 0.69   | 0.58               | 0.63          | 0.65          | 0.62   | 0.69                            | 0.63          | 0.64          | 0.65   |
| น้ำขี้เถ้า           | 9.43                        | 9.41          | 9.40          | 9.41   | 9.79               | 9.75          | 9.80          | 9.78   | 9.29                            | 9.24          | 9.25          | 9.26   |
| น้ำเกลือ             | 7.65                        | 7.51          | 7.63          | 7.60   | 7.38               | 7.32          | 7.36          | 7.35   | 7.35                            | 7.36          | 7.38          | 7.36   |



ภาพ 3 แผนภาพแสดงค่า pH เฉลี่ย จากการวัดด้วย เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล เครื่องวัดกรดเบส pH Meter IONIX และ Vernier LabQuest 2

ตาราง 3 การหาร้อยละความคลาดเคลื่อนจากสารละลายมาตรฐาน

| สารละลาย<br>มาตรฐาน | การเปรียบเทียบค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากสารละลายมาตรฐาน |                       |                    |                       |                                 |                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                     | เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล                                 |                       | Vernier LabQuest 2 |                       | IONIX เครื่องวัดกรดเบส pH Meter |                       |
|                     | ค่าเฉลี่ย                                                   | ร้อยละความคลาดเคลื่อน | ค่าเฉลี่ย          | ร้อยละความคลาดเคลื่อน | ค่าเฉลี่ย                       | ร้อยละความคลาดเคลื่อน |
| Buffer pH 4.00      | 4.52                                                        | 13                    | 4.41               | 10.25                 | 4.47                            | 11.75                 |
| Buffer pH 7.00      | 7.22                                                        | 5.5                   | 7.39               | 9.75                  | 7.25                            | 6.25                  |
| Buffer pH 10.00     | 10.08                                                       | 2                     | 10.37              | 9.25                  | 10.23                           | 5.75                  |

ตาราง 4 สรุปค่าเฉลี่ยสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Two-Factor Without Replication ANOVA

| ตัวอย่างสารทดสอบ | Count | Sum   | Average  | Variance |
|------------------|-------|-------|----------|----------|
| Buffer pH 4.00   | 3     | 13.40 | 4.46667  | 0.00303  |
| Buffer pH 7.00   | 3     | 21.86 | 7.28667  | 0.00823  |
| Buffer pH 10.00  | 3     | 30.68 | 10.22667 | 0.02103  |
| น้ำส้มสายชู      | 3     | 7.59  | 2.53000  | 0.03640  |
| น้ำสบู่          | 3     | 28.04 | 9.34667  | 0.03863  |

| ตัวอย่างสารทดสอบ                | Count | Sum   | Average | Variance |
|---------------------------------|-------|-------|---------|----------|
| น้ำประปา                        | 3     | 23.03 | 7.67667 | 0.00163  |
| น้ำยาล้างจาน                    | 3     | 23.37 | 7.79000 | 0.02920  |
| น้ำยาล้างห้องน้ำ                | 3     | 1.96  | 0.65333 | 0.00123  |
| น้ำซึ่เข้า                      | 3     | 28.45 | 9.48333 | 0.07163  |
| น้ำเกลือ                        | 3     | 22.31 | 7.43667 | 0.02003  |
| เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล     | 10    | 66.29 | 6.62900 | 9.62494  |
| Vernier LabQuest 2              | 10    | 67.33 | 6.73300 | 10.46571 |
| IONIX เครื่องวัดกรดเบส pH Meter | 10    | 67.07 | 6.70700 | 9.67278  |

ตาราง 5 การทดสอบค่าเฉลี่ยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Two-Factor Without Replication ANOVA

| Source of Variation | SS        | df | MS       | F          | P-value     | F crit      |
|---------------------|-----------|----|----------|------------|-------------|-------------|
| Rows                | 267.46736 | 9  | 29.71860 | 1325.58331 | 1.61205E-23 | 2.456281149 |
| Columns             | 0.05859   | 2  | 0.02929  | 1.30661    | 0.295214867 | 3.554557146 |
| Error               | 0.40355   | 18 | 0.02242  |            |             |             |
| Total               | 267.92950 | 29 |          |            |             |             |

จากตาราง 5 สรุปผลการทดลองโดยแยกการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ 2 ปัจจัยคือ

1. กรณีทดสอบว่า เครื่องวัดค่า pH วัดค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสความแตกต่างกันหรือไม่อย่างน้อย 1 คู่

H0: สารละลายมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสไม่แตกต่างกัน

H1: สารละลายมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

ค่า P-value ที่ 0.295 แสดงผลว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญของเครื่องวัดค่า pH ทั้งสามแบบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

2. กรณีทดสอบว่า ตัวอย่างสารทดสอบมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสแตกต่างกันหรือไม่อย่างน้อย 1 คู่

H0: ตัวอย่างสารทดสอบมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสไม่แตกต่างกัน

H1: ตัวอย่างสารทดสอบมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดเบสแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

ค่า P-value ที่ 1.61E-23 แสดงผลว่าตัวอย่างสารทดสอบให้ค่าความเป็นกรดเบสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญของตัวอย่างสารทดสอบทั้ง 10 ชนิด ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

## อภิปราย และข้อเสนอแนะ

ค่า pH ที่วัดจาก เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล เครื่องวัด pH IONIX และ Vernier LabQuest 2 สามารถวัดค่า pH ของสารตัวอย่างได้ใกล้เคียงกัน แต่จะต่างกันที่ทศนิยมของค่า pH เนื่องจากในการประดิษฐ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลอาศัยหลักการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential) ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดวัด (Indicator electrode) ซึ่งจุ่มในสารละลาย แล้วเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่า pH โดย pH Controller Electrode Probe BNC ทำหน้าที่ในการวัดค่า pH ส่วนตัวที่ประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD ประมวลผลและควบคุมโดยโค้ดที่เขียนลง Arduino UNO R3 และ Sensor Module Monitoring Control Board ซึ่ง โค้ดและตัวประมวลผลอาจมีผลทำให้ค่าที่วัดมีค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนมากกว่าเครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ในสารละลายมาตรฐาน Buffer pH 4.00 และมีค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าในสารละลายมาตรฐาน Buffer pH 7.00 และ Buffer pH 10.00 ดังตาราง 3 จากผลที่ได้แม้จากค่าที่อ่านได้ของเครื่องวัดทั้งสามแบบจะแตกต่างกันในทศนิยมตำแหน่งที่ 1-2 แต่การทดลองกรดเบสในระดับการศึกษาขั้นพื้นฐานจะนิยมบอกค่าความเป็นกรดเบสที่เลขตัวเดียวหรือทศนิยมหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2562) จึงสรุปได้ว่า เครื่องวัดค่า pH ที่ผลิตขึ้นสามารถใช้ในการเรียนการสอนเรื่องกรดเบสในห้องเรียนระดับการศึกษาขั้นพื้นฐานได้

นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Two-Factor Without Replication ANOVA ทั้งการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า pH จากเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล เปรียบเทียบเครื่องวัด pH IONIX และเครื่องวัด pH Vernier LabQuest 2 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันของผลการวัดจากทั้งสามเครื่องอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญของค่าที่วัดได้จากตัวอย่างสารทดสอบทั้ง 10 ชนิด อย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ดังตาราง 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถวัดค่าได้ไม่แตกต่างจากเครื่องวัดมาตรฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังสามารถวัดความแตกต่างของสารละลายที่มีความเป็นกรดเบสแตกต่างกันได้ดี

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยพบข้อจำกัดบางประการเกี่ยวกับความเร็วในการประมวลผลในการวัดค่าโดยเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล ซึ่งจะใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่า เครื่องวัด pH IONIX และ Vernier LabQuest 2 เนื่องจากในการเขียนโค้ดได้กำหนดความเร็วในการประมวลผลของ เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัลให้เหมาะสมกับศักยภาพการทำงานของการทำงาน ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่อง ถ้าหากกำหนดให้ความเร็วในการประมวลผลสูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล ทำให้อ่านค่า pH คาดเคลื่อนได้ จึงทำให้ความเร็วในการประมวลผลเครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล จะใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่าเล็กน้อย แต่โดยภาพรวม เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล สามารถประดิษฐ์ขึ้นมาแทนการใช้งาน เครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีราคาสูง เนื่องจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาต่ำ ประกอบได้ง่าย ประสิทธิภาพในการวัดค่า pH ใกล้เคียงกับ เครื่องวัด pH ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

## ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1. การประดิษฐ์เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิทัล โดยการบูรณาการวิทยาการคำนวณเข้ากับเนื้อหาทางเคมีสอดคล้องกับตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน 2551 ทั้งในสาระที่ 2 วิทยาศาสตร์กายภาพ ในมาตรฐาน ว.2.1 และสาระเคมีซึ่งเป็นสาระการเรียนรู้เพิ่มเติม โดยสามารถบูรณาการข้ามไปยังสาระเทคโนโลยี ทั้งในมาตรฐาน ว 4.1 ที่เน้นการใช้เทคโนโลยี การบูรณาการวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ การออกแบบเชิงวิศวกรรม ในการแก้ปัญหาและการดำรงชีวิต รวมไปถึงมาตรฐาน ว 4.2 ที่เน้นวิทยาการคำนวณ การคิดเชิงคำนวณ เทคโนโลยีสารสนเทศ และการรู้เรื่องดิจิทัล (Digital literacy)

2. สามารถนำวิธีการพัฒนาเครื่องวัดค่า pH ไปออกแบบการจัดการเรียนรู้ให้กับผู้เรียนเพื่อศึกษาการพัฒนาแนวคิดทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ทักษะสำคัญในศตวรรษที่ 21 ทักษะการเขียนโค้ด (Coding skills) การคิดเชิงคำนวณ (Computational thinking) ออกแบบกิจกรรมการพัฒนาครูวิทยาศาสตร์และครูเคมี โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะการจัดการเรียนรู้แบบบูรณาการ ในประเด็นเกี่ยวกับเครื่องวัดค่า pH

### ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ประเด็นที่สามารถนำไปต่อยอดและศึกษาต่อคือ การสตรีมข้อมูล (Data streaming) ไปยังสเปรดชีต (Spreadsheet) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหรือการสร้างกราฟแบบ real-time
2. ศึกษาการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านระบบเครือข่ายได้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์นำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย “การพัฒนาสมรรถนะในการออกแบบและการจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ของนักศึกษาครูฝึกประสบการณ์วิชาชีพด้วยกิจกรรมสะสมแต้มตามกรอบแนวคิดดีไอวาย ทิงเกอร์ และเมกเกอร์” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากคณะศึกษาศาสตร์ในปีงบประมาณ 2563

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อ.ธีรวัช นันทา อาจารย์กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องวัด pH IONIX และ บริษัท เวอร์เนียร์ ไทย จำกัด สำหรับอุปกรณ์ Vernier LabQuest 2 ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *ตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พุทธศักราช 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- ทวีศักดิ์ จินดานุรักษ์. (2559). นวัตกรรมและสื่อในการจัดการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 21. *วารสารวิชาการ Veridian E-Journal สาขามนุษยศาสตร์สังคมศาสตร์ และศิลปะ มหาวิทยาลัยศิลปากร*, 9(1), 560-581.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2562). *หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เคมี เล่ม 4 ตามผลการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สายรุ้ง ขาว สุภา. (2559). ชุดทดลองอย่างง่ายสำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยค่าดัชนีหักเหของแสง. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 7(2), 339-349.
- อาร์ชียะ ดินอะ , สุภาพ ตาเมือง , มะลิวรรณ อมตงไชย , ปุริม จารุจรัส และเสนอ ชัยรัมย์ (2016). ชุดการไทเทรตอย่างง่ายแบบย่อส่วนและต้นทุนต่ำสำหรับปฏิบัติการระดับ ไมโครในห้องเรียน. *วารสารหน่วยวิจัย วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม เพื่อการเรียนรู้*, 7(2), 424-436.
- Ehlers, C., Ivens, U. I., Møller, M. L., Senderovitz, T., & Serup, J. (2001). Comparison of two pH meters used for skin surface pH measurement: the pH meter 'pH900' from Courage & Khazaka versus the pH meter '1140' from Mettler Toledo. *Skin research and Technology*, 7(2), 84-89.

- Harris, D. L., & Harris, D. C. (1992). A low-cost pH meter for the classroom. *Journal of Chemical Education*, 69(7), 563.
- Holmquist, D. D., Randall, J., & Volz, D. L. (2007). *Chemistry with Vernier: Chemistry Experiments Using Vernier Sensors*. Beaverton OR: Vernier Software & Technology.
- Holstermann, N., Grube, D., & Bögeholz, S. (2010). Hands-on activities and their influence on students' interest. *Research in science education*, 40(5), 743-757.
- Kubínová, S., & Štěgr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for low-cost chemical measurements in lecture and laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92 (10), 1751-1753.
- Lyon, J. (2015). *Developing a Non-Glass pH Meter*. Retrieved from <https://www.pcs.cnu.edu/~dgore/Capstone/files/LyonJ.pdf>.
- Masud, M. A., Mashud, M. A. A., & Islam, M. S. (2011). Design and development of microcontroller based digital pH meter. *Ulab Journal of Science & Engineering*, 2(2), 31-35.
- National Research Council. (2006). *America's lab report: Investigations in high school science*. Washington, DC: National Academies Press.
- Papadopoulos, N. J., & Jannakoudakis, A. (2016). A chemical instrumentation course on microcontrollers and op amps. construction of a pH meter. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1323-1325.
- Selco, J. I., Bruno, M., & Chan, S. (2012). Students Doing Chemistry: A Hand-On Experience for K-12. *Journal Of Chemical Education*, 89(2), 206-210.
- Supasorn, S. (2015). Grade 12 students' conceptual understanding and mental models of galvanic cells before and after learning by using small-scale experiments in conjunction with a model kit. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(2), 393-407.
- Yayon, M., Rap, S., Adler, V., Haimovich, I., Levy, H., & Blonder, R. (2019). Do-It-Yourself: Creating and Implementing a Periodic Table of the Elements Chemical Escape Room. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 132-136.